

共振器型レーザー駆動誘電体加速器の研究

STUDY ON A LASER-DRIVEN DIALECTIC ACCELERATOR WITH A RESONATOR

小山和義^{*A,C)}、Zhaofu Chen^{B)}、上坂充^{C)} 吉田光宏^{A)}

Kazuyoshi Koyama^{*A,C)}, Zhaofu Chen^{B)}, Mitsuru Uesaka^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{A)}

^{A)}KEK, 1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, Japan, 305-0818

^{B)}NEM, U. Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-8656

^{C)}UTNS, U. Tokyo, 2-22, Shirakatashirane, Tokai-mura, Ibaraki-ken, Japan, 319-1188

Abstract

A laser-driven dielectric accelerator which delivers around 1MeV electron beam might be suitable for irradiating a sub-micron beam to a specific organelle of a biological cell. A Fabry-Pérot (FP) resonator with a transmission grating (TRG) is capable to realize a compact accelerator energized by a commercially available small scale fiber laser. A self-image of an acceleration electric field produced by the TRG is transferred in the FP resonator and accelerate electrons. However, the FP-TRG is valid only for the relativistic electrons. In advance of an acceleration experiment, parameters for the experiment were determined by a simulation of electron trajectories in a proximity electric field of the TRG. Serious deflection of electron beam towards the grating surface limited the injection phase as well as the height of the injection point from the TRG surface. The energy gain for the 50-keV electron was estimated to be 1 keV in the traveling distance of 15-micron at the optimum condition. 425-nm pitch gratings were fabricated by the electron lithography technique.

1. はじめに

我々は、放射線生物学の基礎研究を多くの場所で可能にするために、光学顕微鏡下で細胞の狙った位置に1ミクロン以下のビームを照射して、その後の生物学的・化学的变化をその場観察し測定可能な装置の開発を行っている。装置は電源を含めてテーブルトップサイズ以下であることが望ましく、必要なビームのエネルギーと電荷量はそれぞれは約1MeVと0.01fCである[1][2]。レーザー駆動誘電体加速では、レーザー波長程度の大きさの周期構造を持つ誘電体によってレーザー光の伝播を制御して荷電粒子加速が可能な電界を発生する。加速勾配は構造と材料に依存するが、1GeV/mと高周波加速器より約1桁大きな値が可能である。電子ビームの直径は、幅がレーザー波長の半分以下の加速チャンネルから出た直後では、サブミクロンであり放射線生物学研究用のマイクロビームとしての条件を満たしている。また、電子パルス当たりの電荷量も放射線生物学研究用に必要な値を満たす。

これまでに、誘電体加速器の主要構成要素である矩形断面の格子を持った透過型回折格子 (binary blazed transmission grating) に対して、加速のための最適寸法を解析および数値計算によって求め、回折格子を試作した。電子を加速するためには、回折格子の周期を Λ 、レーザー波長を λ_0 、電子の速度と光速をそれぞれ v と c として、電子と加速電界の同期条件

$$N \cdot v/c = \Lambda/\lambda_0 \quad (1)$$

を満たす必要がある。ただし N は回折格子によって作られる電界分布の空間周波数の次数である。

現在の誘電体加速の構造では、レーザーパルスは一回しか電子と相互作用しないので効率が悪く、レーザーが大掛かりになる。もし、レーザー駆動誘電体加速で共振器構造が可能になれば、小型のレーザーの出力を

光ファイバーで伝えて誘電体加速器を励起することができるので実用の観点からは望ましい。本稿では、初歩的段階ではあるが、レーザー駆動誘電体加速への共振器構造の導入の検討結果と加速実験の準備状況に関して述べる。

2. 共振器型誘電体加速器

2.1 レーザーの性能

レーザーのパルス幅は短い方が誘電体のレーザー誘起破壊閾値 (LIDT: Laser induced damage threshold) が高く、加速電界を大きくできるので、レーザー駆動誘電体加速実験にはフェムト秒レーザーを用いることが多い。しかし、フェムト秒レーザーはパルス圧縮が必要であり非線形光学効果の影響が大きく、パルス圧縮やガイドのために光ファイバーを使うことができず、装置を小さくすることは難しい。しかし、Fig. 1に見られるように、光ファイバーで出力されるレーザーは、パルス幅が10ps付近では市販されておりレーザー加工などに応用されている。光導波のためのシングルモードファイバーは直径は数 μm であり伝送できるエネルギーは限られる。しかし、光結晶ファイバー (PCF: Photonic crystal fiber) を用いると導波路の直径を10倍程度大きくできるので、シングルモードファイバーの約100倍 (1mJ) のエネルギーを伝えることができる。加速器に使用する誘電体も光ファイバーも共に石英を使うことが多いのでLIDTに大きな違いはない。したがって、加速チャンネルを共振器で構成して光エネルギーを蓄積できれば、パルスエネルギーが1mJでパルス幅が10ps程度のレーザーで高強度電界を発生することによって、レーザーも含めた装置全体の小型化が可能になる。

2.2 共振器構造

光共振器の光子寿命を τ_Q 、レーザーのパルス幅を τ_L 、共振器の体積 (面積 \times 奥行き) を $V = A \times \ell$ 、レーザー

*koyamakz@post.kek.jp

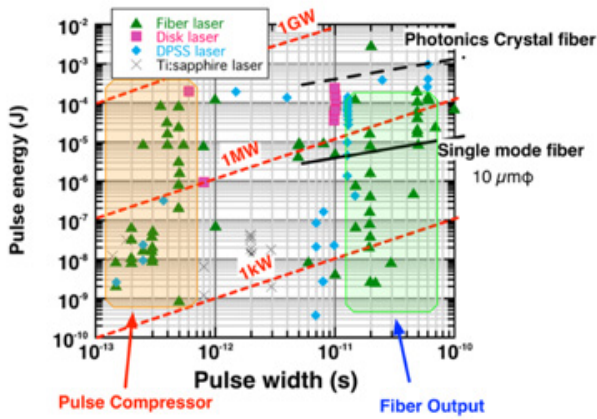


Figure 1: Pulse energies and pulse widths of commercially available lasers. The solid line and the broken line are threshold values of optical breakdown of the optical fibers. The original figure was produced by Kokyo Inc. [3]

のパワーを p_L として、矩形パルスの場合の共振器内部の光の最高強度は、

$$I_{Q_{\max}} = c\varepsilon_0 E_Q^2 = c \frac{p_L \tau_Q}{V} \left(1 - \exp \left[-\frac{\tau_L}{\tau_Q} \right] \right) \quad (2)$$

になる。石英の LIDT の実験値を Fig. 1 に白丸で表す。LIDT はレーザーのパルス幅のべき乗で近似できて、

$$I_{LID} = I_{LID0} \tau_Q^q \quad (3)$$

$q = -0.603$, $I_{LID0} = 2.43 \times 10^{12}$ となる。式 (3) では、レーザーのパルス幅 τ_L を共振器の光子寿命 τ_Q に置き換えた。

光共振器には、誘電体多層膜構造を持つ一対の高反射率の鏡から成るファブリー・ペロー (FP) 共振器を用いる。LIDT が高い多層膜は石英 SiO_2 とハフニア HfO_2 の層を使うことが多い。LIDT の測定データは少ないが外挿により石英の値の 50% ~ 70% と推定される。入射レーザー強度とレーザーパワーの関係 $I_L = p_L/A$ を使って、 Q 値と共振器内の光の強度が与えられた時に、LIDT まで到達可能なレーザー照射強度を求めると、

$$I_L < I_{LID0} (\tau_Q [\text{ps}])^q \frac{\lambda_0}{2c (10^{-12} \tau_Q [\text{ps}]) (1 - e^{-\tau_L/\tau_Q})} \quad (4)$$

となる。

Figure 2 は式 (4) をグラフに描いたものである。この図からは、例えば、 Q 値が 100 の共振器に、パルス幅が 100fs のレーザーを 4×10^{12} W/cm² の照射強度で入射すると、共振器内に蓄積される光の強度を 100fs のレーザーパルスに対する LIDT と同程度の値 (1.5×10^{13} W/cm²) にすることが可能であると言える。なお、光学分野では Q 値ではなくフィネス \mathcal{F} を用いることが多い。 Q 値とフィネスの間には $Q = (\omega_0 l / \pi c) \mathcal{F}$ の関係があり、 $l = \lambda_0/2$ の場合には $Q = \mathcal{F}$ となる。FP 共振器の内面を回折格子構造とした場合には、FP 共振器の横幅 (横モードに関係) は狭く ($a < \lambda_0/2$)、フレネル

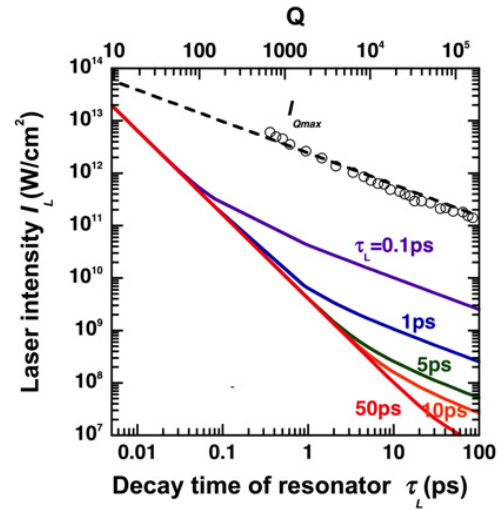


Figure 2: The relation between the decay time of the resonator (Q factor) and the laser intensity for producing the light intensity in the resonator as high as the laser induced damage threshold (LIDT) of the dielectric.

数 $N_F = a^2/\lambda_0 l$ が小さくなるので横モードの損失が増大してレーザー光の蓄積は困難になる。

FP 共振器とバイナリーブレイズ格子を組み合わせるに当たり、二つの配位が考えられる。(1)FP 共振器の内面を格子構造にする配位と、(2)共振器を構成する鏡の外側を Fig. 3(a) のように格子構造にする配位である。いずれの配位でも回折格子の加工は片方の鏡だけでよいが、(1)の構造は上述のように Q 値が小さくレーザー光のエネルギー蓄積はできない。(2)の共振器の外側に回折格子を置く構造ではタルボ効果によって共振器内部に回折格子透過直後と同じパターン (自己像) を作る事が可能である。この様子を Fig. 3(b) に示す。レーザーの進行方向に現れるパターンの周期はタルボ長に一致し、 $Z_T = \lambda_0 / \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_0^2/\Lambda^2} \right)$ である。この関係式が成り立つのは $\Lambda \geq \lambda_0$ の場合である。すなわち、(2)の配位は相対論的電子の加速には有効であるが、非相対論的電子を加速する電界を作ることはできない。非相対論的電子を加速するためには FP 共振器に直交する周期構造を加えてレーザー入射方向を変えることによって同期条件を満たす電界を発生することが可能である。しかし、横方向の強度分布が極端に不均一であり加速器への応用はまだ難しい。

3. 加速実験に向けて

前節で述べたような共振器構造では、非相対論的電子の加速は不可能であるため、加速実証実験には単純なバイナリーブレイズ回折格子を用いる。一対の対向した回折格子から二つのレーザーパルスを入射する配位は対称性に優れているが、調整が難しい。そこで、加速実験は一つの回折格子を一つのレーザーで照射することから始める。非相対論的電子を一枚の回折格子と一つのレーザーパルスで加速した実験は報告されているが、そこでは格子定数をレーザー波長に等しくして、加速方向への電界の空間分布の高調波成分 ($N = 3$) を

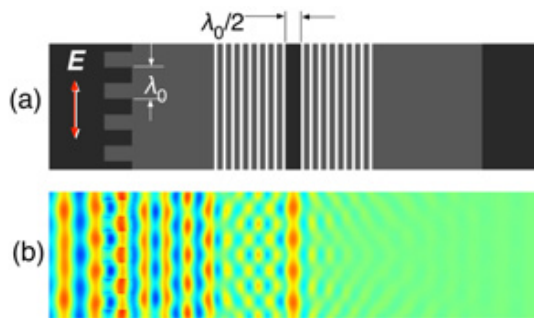


Figure 3: (a)The geometry of the Fabry-Pérot resonator with the transmission grating. The linearly polarized laser pulse comes from left side. (b)The distribution of the electric field component along the cavity.

使って電子を加速した [4]。格子定数を同期条件 (式 (1)) に一致させて電界の空間分布の基本波成分を使う方が加速勾配を大きくできる。しかし、格子の幅は 200nm 程度になり、加工には通常の光リソグラフィーは使うことができないので、物材機構・微細加工プラットフォームの支援を受け、電子線リソグラフィーを用いて作成した。

誘電体加速では近接場の電界分布を加速に応用しており、一枚の回折格子では加速に寄与する電界強度が回折格子から離れるにつれて指数関数的に減少するだけでなく、回折格子に向かう方向（または離れる方向）の電界も無視できない。加速実験で得られるエネルギー利得を見積るために、電界の近似式を使い電子の軌道計算を行った。実験で予定しているパラメータを Table 1 に、エネルギー利得 ΔE と電子軌道の偏倚 Δd を電子の加速電界への入射位相 ϕ_0 と回折格子表面からの入射高さ d_0 の関数として Figure 4 に示す。実験では電子ビームの直径を $1 \mu\text{m}$ 以下にすることは難しい上に電界強度は 150 nm の間に急速に変化するので、出力電子のエネルギー分布は入射エネルギー (50 keV) を中心にして最高が 1 keV の幅広い変調を受けた分布になることが予想される。

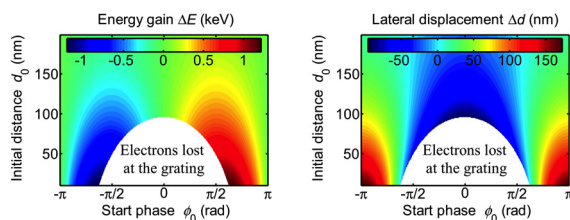


Figure 4: (Left)The energy gain as a function of the initial phase and the initial height. (Right)The lateral displacement as a function of the initial phase and the initial height.

4. まとめ

レーザー駆動誘電体加速器を放射線生物学研究に応用するために研究を行なっている。装置の大きさはテーブルトップサイズ以下であることが望ましく、必要なビームのエネルギーは約 1 MeV で必要な最小電荷量は 0.01 fC

Table 1: Experimental Parameters

Grating	
Material	SiO_2
Period	$\Lambda = 425 \text{ nm}$
Pillar width	$W_p = 225 \text{ nm}$
Pillar height	$H_p = 288 \text{ nm}$
Acceleration length	$L_a = 15 \mu\text{m}$
Laser	
Type	Yb: fiber
Wavelength	$\lambda_0 = 1030 \text{ nm}$
Pulse width	$\tau_L = 1 \text{ ps}$, after compression
Pulse energy	$U = 100 \text{ nJ}$ (without disk amp.)
Focal spot (FWHM)	$w_x = L_a = 15 \mu\text{m}$; longitudinal $w_y = 5 \mu\text{m}$; transverse
Electron source (to be tested)	
Type	Photocathode
Electron energy	$E_{ca} = 50 \text{ keV}$
Energy spread	$\Delta E_{ca}/E_{ca} = 0.1 \%$
Beam diameter	$d < 20 \mu\text{m}$

である。ファブリー・ペロー共振器と矩形格子の組み合わせた形式配位で共振器を構成する鏡の外側でタルボ距離に回折格子を設置した場合、共振器内部に回折格子直後の自己像を生成して電子加速が可能になる。この配位は、相対論的電子に対してのみ応用可能である。共振器内に蓄積される光の強度を 100 fs のレーザーパルスに対する LIDT と同程度の値 ($1.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$) にするためには、 $Q = 100$ の共振器と照射強度が $4 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ のレーザーが必要になると、見積もることができた。

加速の実証実験は実験の難しさを緩和するために一つの回折格子を一つのレーザーで照射して行う予定である。一枚の回折格子では加速に寄与する電界は回折格子から 150 nm の間に指数関数的に減少するので、我々のレーザーを使う場合、初期エネルギーが 50 keV の電子の場合、エネルギーが最高 1 keV の変調を受けることが予想される。実験に備えて格子間隔が 425 nm の石英性の透過型回折格子を試作した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15H03595 の助成を受け、回折格子の制作は、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 (NIMS 微細加工プラットフォーム) の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Uesaka *et al.*, Rev. Accel. Sci. and Tech., **9**, 235 (2016).
- [2] K. Koyama *et al.*, J. Phys. B: Atom Mol. Opt. Phys, **47**, 234005 (2014).
- [3] <http://optipedia.info/lsource-index/laser-index/ultrashort-pulse/fs-pulsewidth-pulseenergy/>
- [4] J. Breuer and P. Hommelhoff, Phys. Rev. Lett. **111**, 134803 (2013).